



Laboratoire MACS

Modélisation, Analyse, Contrôle des Systèmes

Organisent

# *EpiCasa07*

Formation Thématique  
Introduction à l'épidémiologie :  
Modèles et Méthodes Mathématiques et Statistiques

19 - 30 Novembre 2007  
Casablanca, Maroc

<http://colloque.inra.fr/epicasa07/>

(Inscription en ligne, Nombre de places limité)



---

EPI CASA07

*Introduction à l'épidémiologie :  
modèles et méthodes mathématiques et statistiques*

Faculté des Sciences Aïn Chock, Casablanca, Maroc

19-30 novembre 2007

<https://informatique-mia.inrae.fr/epicasa/epicasa07>

---

## PROGRAMME FINAL

### Organisateurs



Suzanne TOUZEAU

INRA  
UR341 Mathématiques et Informatique Appliquées  
Centre de Recherche de Jouy-en-Josas  
France



Khadija NIRI

Université Hassan II  
Faculté des Sciences – Aïn Chok  
Département de Mathématiques et Informatique  
Casablanca, Maroc



Abderrahman IGGIDR

INRIA-Lorraine  
Institut Supérieur de Génie Mécanique et Productique  
Université Paul Verlaine – Metz  
France



# Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier les institutions suivantes :

- Université Hassan II – Casablanca,
- Faculté des Sciences Ain Chock,
- École Supérieure de Technologie, Université Hassan II – Casablanca,
- Institut Supérieur d'Études Maritimes, Casablanca,
- INRA (MRI, départements MIA, SA, SPE), France
- INRIA, France
- CIMPA,
- Ambassade de France au Maroc (SCAC),

pour leur soutien précieux dans l'organisation de cette manifestation, qu'il ait été financier, logistique ou humain.

Merci à tous les intervenants d'avoir accepté de consacrer du temps à notre formation.

Enfin, sans l'appui des administrateurs et techniciens de la Faculté des Sciences et de Patricia POPHILLAT de l'INRA, nous n'aurions pas pu monter ce projet. Nous les en remercions vivement.

Khadija NIRI, Abderrahman IGGIDR, Suzanne TOUZEAU



# Table des matières

<b>Présentation</b>	<b>7</b>
<b>Motivations</b>	<b>9</b>
<b>Objectif et contenu</b>	<b>9</b>
<b>Impact attendu</b>	<b>10</b>
<b>Public visé</b>	<b>10</b>
<b>Intervenants</b>	<b>11</b>
<b>Comité d'organisation</b>	<b>11</b>
<b>Partenaires financiers</b>	<b>11</b>
<b>Perspectives</b>	<b>12</b>
<b>Programme</b>	<b>13</b>
<b>Planning</b>	<b>15</b>
1    Inscriptions . . . . .	15
2    Horaires et salles . . . . .	15
3    Bilan et restitution . . . . .	15
<b>Cours</b>	<b>19</b>
C.1  Systèmes dynamiques en épidémiologie : modélisation et analyse qualitative – Michel LANGLAIS, Gauthier SALLET, Abderrahmn IGGIDR . . . . .	20
C.2  Processus stochastiques pour modéliser la diffusion d'épidémies – Elisabeta VERGU	21
C.3  Épidémiologie clinique – Fabrice CARRAT . . . . .	22
C.4  Statistique et épidémiologie végétale – Joël CHADŒUF . . . . .	23
<b>Illustrations</b>	<b>25</b>
I.1  Propagation du BVDV entre troupeaux bovins – Pauline EZANNO . . . . .	26
I.2  Propagation de la tremblante dans un troupeau ovin – Suzanne TOUZEAU . . . . .	26
I.3  Approche spatiale de l'épidémiologie de l'ESB en France – Christian DUCROT . . . . .	27
I.4  Gestion des résistances en épidémiologie végétale – Christian LANNOU . . . . .	27
<b>Liste des participants</b>	<b>29</b>

## Tableaux

1	Contenu de la formation : modélisation × applications. . . . .	10
2	Planning semaine 1. . . . .	16
3	Planning semaine 2. . . . .	17
4	Liste des intervenants. . . . .	28
5	Liste des participants . . . . .	30





# Présentation



# Motivations

L'épidémiologie est l'étude des facteurs de risque et de la propagation de maladies, dans des populations humaines, mais aussi, par extension du cadre strict, animales ou végétales. Elle fait très souvent appel à des outils et modèles de la statistique, ainsi qu'à des modèles dynamiques déterministes ou stochastiques. Ces approches sont utilisées dans le processus de recueil et d'analyse de données, mais aussi via les modèles pour prédire ou contrôler la diffusion d'agents pathogènes. Dans le contexte de la mondialisation des problèmes infectieux et celui des maladies émergentes, les modèles mathématiques et statistiques représentent des outils puissants d'analyse et de prédiction. Inversement, les mathématiques peuvent se nourrir des problèmes ouverts que l'approche de modélisation des phénomènes biologiques génère. L'interface entre les mathématiques et la biologie et plus précisément celle avec l'épidémiologie s'impose donc comme un champ de recherche fascinant, foisonnant de questions ouvertes et de zones inexplorées.

Or les cursus en mathématiques appliquées n'abordent que rarement le domaine de l'épidémiologie et même plus généralement des sciences du vivant, ou alors très partiellement. En France, des cursus spécialisés en mathématiques et/ou statistiques pour la biologie ont commencé récemment à être proposés dans un nombre croissant d'universités, après une relativement longue période où cette spécialité était peu représentée. Dans les pays francophones du Maghreb et d'Afrique subsaharienne en revanche, il n'existe que peu de formations en mathématiques appliquées orientées vers des problématiques du vivant, et moins encore vers l'épidémiologie. Les étudiants ont ainsi des difficultés à se représenter comment leur formation pourrait leur permettre de résoudre des questions motivées par des problématiques biologiques. Certaines universités, au Royaume Uni par exemple, proposent des formations en épidémiologie de très bonne qualité, mais elles sont en général en anglais et parfois très chères.

Le succès rencontré par l'École CIMPA *Modèles et outils mathématiques pour l'analyse et la régulation des systèmes halieutiques*, co-organisée par Abderrahman IGGIDR en Mauritanie en juillet 2005, nous a motivé pour monter une nouvelle formation en biomathématiques, en français et en Afrique francophone.

En outre, lors du workshop organisé à Casablanca en novembre 2006 sur l'*État de l'Art de la Modélisation Mathématique dans le Domaine des Sciences* par Khadija NIRI, le besoin de formations sur des thèmes appliqués aux sciences du vivant a été clairement exprimé. La Faculté des Sciences Aïn Chok de Casablanca était prête à soutenir de telles initiatives.

Toutes ces raisons nous amènent à penser que la formation que nous proposons sur les *modèles et méthodes mathématiques et statistiques en épidémiologie* serait utile à de nombreux étudiants en master ou en thèse de mathématiques appliquées, et même à certains chercheurs, au Maghreb et en Afrique subsaharienne, le Maroc jouant le rôle de relais.

## Objectif et contenu

L'objectif de cette formation est de donner des notions de base en épidémiologie et modélisation à des étudiants, voire des chercheurs, en mathématiques et statistiques, afin de leur permettre d'appliquer leurs connaissances à la résolution de problèmes pratiques.

Cette formation couvre l'épidémiologie classique, comme l'étude de facteurs de risque, les modèles de survie, les études cas-témoin ; la modélisation dynamique déterministe et stochastique de la propagation d'épidémies, des modèles SI aux modèles individu-centrés ; les modèles statistiques explicatifs ; les modèles spatiaux de dispersion. Elle propose des cours méthodologiques et des illustrations variées en épidémiologie humaine, animale et végétale. Ainsi, sans prétendre

à l'exhaustivité, cette formation offre un panorama relativement complet des concepts épidémiologiques classiques ainsi que des modèles et méthodes mathématiques et statistiques utilisés en épidémiologie. Le contenu des cours et des illustrations est présenté plus en détails dans le programme ci-dessous. Le tableau TABLE 1 synthétise les points abordés, en mettant en relation les types de modélisation et les domaines d'application.

		Application en épidémiologie		
		humaine	animale	végétale
Modélisation	modèles statistiques	<b>C</b>	<b>I</b>	<b>C</b>
	systèmes dynamiques déterministes	<b>C</b>	<b>C+I</b>	<b>I</b>
	processus stochastiques	<b>C</b>	<b>C+I</b>	
	modèles individus-centrés		<b>C+I</b>	<b>I</b>
	modèles spatiaux		<b>I</b>	<b>C</b>
	modèles spatiaux-temporels		<b>C</b>	

**C** : cours      **I** : illustration

TABLE 1 – Contenu de la formation : modélisation × application.

## Impact attendu

Les personnes ayant suivi cette formation devraient être capables de comprendre des articles scientifiques décrivant la mise en place d'essais ou d'études pour la collecte de données en épidémiologie ou concernant les mathématiques appliquées à l'épidémiologie, de réaliser des analyses classiques de données, de modéliser un problème épidémiologique simple, de s'impliquer dans un projet de recherche en épidémiologie avec des biologistes.

Cette formation veut apporter un plus aux futurs jeunes diplômés, pour leur faciliter l'accès à l'emploi dans des instituts privés ou de service public concernés par la propagation des maladies infectieuses humaines, animales ou végétales.

D'une manière plus générale et à plus long terme, cette formation se propose de contribuer, par l'élargissement du cercle de scientifiques compétents en épidémiologie et en modélisation des problèmes infectieux, à la consolidation de ce domaine en Afrique francophone.

## Public visé

Cette formation s'adresse à des étudiants ou des chercheurs en mathématiques appliquées et statistiques qui souhaitent s'initier à l'épidémiologie, se familiariser avec les méthodes mathématiques et statistiques usuellement employées dans ce domaine et s'approprier la démarche de modélisation. Le niveau minimum requis est un master de mathématiques appliquées et/ou de statistiques, voire une maîtrise.

La participation à cette formation n'est pas réservée à l'Université de Casablanca et aux universités voisines et est accessible à toutes les personnes remplissant les critères ci-dessus. Mais de par la localisation et la langue retenue, nous ciblons plus particulièrement les universités et écoles supérieures des pays d'Afrique francophone.

**Pré-requis** Outre une bonne maîtrise de la langue française, il serait bon que les participants aient des connaissances de base dans les domaines suivants :

- probabilités et statistiques : variables aléatoires, distributions de probabilités continues et discrètes, estimateurs, modèles de régression ;
- algèbre linéaire : matrices et leurs éléments propres ;
- systèmes dynamiques : équations différentielles, stabilité ;
- connaissance d'un langage de programmation : Scilab, R, Matlab.

## Intervenants

La formation s'appuie principalement sur des intervenants de deux instituts de recherche français, l'INRA (départements MIA, SPE et SA) et l'INRIA (Loria et Futurs), mais aussi de l'INSERM et des universités Bordeaux 2 et Paris 6, France. Ces intervenants sont d'horizons différents : mathématiciens, statisticiens, médecin et biologistes, impliqués en épidémiologie par leurs travaux de recherche.

La liste des intervenants est fournie en TABLE 4, page 28.

## Comité d'organisation

- Khadija NIRI, Faculté de Sciences Aïn Chock, Université de Casablanca, Maroc
- Suzanne TOUZEAU, UR341 MIA, INRA Jouy-en-Josas, France
- Abderrahman IGGIDR, ISGMP, INRIA-Lorraine, France
- Larbi AFIFI, Faculté de Sciences Aïn Chock, Université de Casablanca, Maroc
- Elisabeta VERGU, UR341 MIA, INRA Jouy-en-Josas, France
- Christian LANNOU, UMR1290 BIOGER, INRA Grignon, France
- Patricia POPHILLAT, UR341 MIA, INRA Jouy-en-Josas, France

## Partenaires financiers

### **INRA** France

- Mission des Relations Internationales
- Département Mathématiques et Informatique Appliquées

### **Université Hassan II** Casablanca, Maroc

- Recherche et Coopération
- Faculté des Sciences Aïn Chock
- École Supérieure de Technologie

### **INRIA** France

- Direction des Relations Internationales (Afrique)

### **CIMPA** Centre International de Mathématiques Pures et Appliquées, Nice, France

### **Ambassade de France au Maroc** Service de Coopération et d'Action Culturelle

# Perspectives

Selon le succès remporté par cette première édition, nous envisagerons de renouveler et pérenniser cette formation, sous ce même format, ou/et sous forme de modules plus spécialisés et de séminaires.

# Programme





# Planning

## 1 Inscriptions

Les inscriptions ont lieu à la Faculté des Sciences Aïn Chock, dans la « Salle des Laboratoires » :

*lundi 19 novembre matin, 8h-9h.*

## 2 Horaires et salles

### Horaires

*matin* 08h30-10h00 : cours, illustration

10h00-10h30 : pause café

10h30-12h00 : cours, illustration (suite)

*midi* 12h00-14h00 : pause déjeuner

*après-midi* 14h00-15h30 : TD, TP

15h30-16h00 : pause café

16h00-17h30 : TD, TP (suite)

### Salles

— Faculté des Sciences Aïn Chock :

- Salle des Séminaires (cours, illustrations, TD),
- Salle des Masters (cours, illustrations, TD),
- Salle des Laboratoires (inscriptions, pauses café)

— École Supérieure de Technologie.

- Salles B1 & B3 (TP),
- Cafétéria (déjeuners, pauses café)

## 3 Bilan et restitution

Un bilan de la formation est organisé :

*vendredi 30 novembre après-midi, à partir de 16h00,*

avec comme programme :

- retour des étudiants (en groupes),
- retour des intervenants et des organisateurs,
- discussion sur les suites à la formation.

**Semaine 1 : 19-23 novembre 2007**

	<i>Lundi</i>	<i>Mardi</i>	<i>Mercredi</i>	<i>Jeudi</i>	<i>Vendredi</i>
08h30-10h00	<b>Inscriptions (8h-9h)</b> [FS Labo] <b>Ouverture (9h)</b> [FS Théâtre]	<b>C1</b> : Systèmes dynamiques <sup>ES</sup> <b>A</b> M. LANGLAIS [FS Mas]	<b>C1</b> : Systèmes dynamiques <sup>ES</sup> <b>A</b> M. LANGLAIS [FS Mas]	<b>C1</b> : Sys. dyn. <sup>ES</sup> <b>H</b> G. SALLET [FS Sem]	<b>C2</b> : Proc. stoch. <sup>ES</sup> <b>A,H</b> E. VERGU [FS Sem]
10h00-10h30	<i>Pause café</i> [FS Labo]				
10h30-12h00	<b>C1</b> : Sys. dyn. <sup>ES</sup> <b>A</b> M. LANGLAIS [FS Mas]	<b>C1</b> : Systèmes dynamiques <sup>ES</sup> <b>H</b> G. SALLET [FS Sem]		<b>TD1</b> : Sys. dyn. A. IGGDR [FS Sem]	<b>C2</b> (suite)
12h00-14h00	<i>Déjeuner</i> [EST, Cafét.]				
14h00-15h30	<b>C1</b> : Systèmes dynamiques G. SALLET, A. IGGDR [EST, B1&B3]			<b>I1</b> : Tremblante <sup>ES</sup> <b>A</b> S. TOUZEAU [FS Sem]	<b>I2</b> : BVDV bovine <sup>ES</sup> <b>A</b> P. EZANNO [FS Sem]
15h30-16h00	<i>Pause café</i> [EST, Cafét.]				
16h00-17h30	<b>TP1</b> Initiation <i>Scilab</i> G. SALLET, S. TOUZEAU [EST, B1&B3] <b>TP</b> (suite)	<b>TP1</b> Sys. dyn. G. SALLET, S. TOUZEAU [EST, B1&B3]	<i>Quartier libre</i>	<b>I1</b> (suite)	<b>I2</b> (suite)

**C** : cours    **I** : illustration    **TD** : travaux dirigés sur papier    **TP** : travaux pratiques sur ordinateur

<sup>ES</sup> domaine d'application des exemples et illustrations : **A**=animal    **H**=homme    **V**=végétal

Faculté des Sciences – [FS Sem] : Salle des Séminaires    [FS Mas] : Salle des Masters    [FS Labo] : Salle des Laboratoires  
École Supérieure de Technologie – [EST, B1&B3] : Salles B1 & B3    [EST, Cafét.] : Cafétéria

TABLE 2 – Planning semaine 1.

**Semaine 2 : 26-30 novembre 2007**

	<i>Lundi</i>	<i>Mardi</i>	<i>Mercredi</i>	<i>Jeudi</i>	<i>Vendredi</i>
<i>08h30-10h00</i>	<b>C3</b> : Épid. clinique <sup>☞</sup> <b>H</b> F. CARRAT [FS Sem]	<b>TD3</b> : Épid. clinique F. CARRAT [FS Sem]	<b>C4</b> : Statistique et épidémiologie végétale <sup>☞</sup> <b>V</b>	J. CHADŒUF [FS Sem]	
<i>10h00-10h30</i>	<i>Pause café</i> [FS Labo]				
<i>10h30-12h00</i>	<b>C3</b> (suite)	<b>TD3</b> (suite)		<b>C4</b> (suite)	
<i>12h00-14h00</i>	<i>Déjeuner</i> [EST, Cafét.]				
<i>14h00-15h30</i>	<b>C3</b> (suite)	<b>TD4</b> : Stat. & plantes J. CHADŒUF [FS Mas]	<b>I4</b> : Résistances <sup>☞</sup> <b>V</b> C. LANNOU [FS Mas]	<b>TP4</b> : Statistique & épidémiologie végétale J. CHADŒUF, C. LANNOU [EST, B1&B3]	
<i>15h30-16h00</i>	<i>Pause café</i> [FS Labo]				
<i>16h00-17h30</i>	<b>C3</b> (suite)	<b>TD4</b> (suite)	<b>I4</b> (suite)	<b>TP4</b> (suite)	<i>Bilan &amp; restitution</i> [FS Labo] <b>Clôture (18h)</b> [FS Labo]

**C** : cours    **I** : illustration    **TD** : travaux dirigés sur papier    **TP** : travaux pratiques sur ordinateur

<sup>☞</sup> domaine d'application des exemples et illustrations : **A**=animal    **H**=homme    **V**=végétal

Faculté des Sciences – [FS Sem] : Salle des Séminaires    [FS Mas] : Salle des Masters    [FS Labo] : Salle des Laboratoires  
École Supérieure de Technologie – [EST, B1&B3] : Salles B1 & B3    [EST, Cafét.] : Cafétéria

TABLE 3 – Planning semaine 2.



# Cours

Les cours présentent des concepts de base en épidémiologie en s'appuyant sur des exemples : démarche de modélisation, outils mathématiques et statistiques nécessaires à la formalisation et la résolution de problématiques épidémiologiques.

Les cours intègrent des rappels mathématiques sur les points qui ne sont pas nécessairement traités dans les cursus classiques. Ils sont complétés par des :

**TD** travaux dirigés pour mettre en application sur le papier les concepts et méthodes enseignées lors des cours, à travers des exercices ou des synthèses d'articles scientifiques ;

**TP** travaux pratiques en salle informatique pour implémenter certaines méthodes vues en cours.

Logiciels :

- *Scilab*,<sup>1</sup> (module de formation),
- *R*,<sup>2</sup> (utilisation plus ponctuelle).

## Liste de Cours

<b>C.1</b>	Systèmes dynamiques en épidémiologie : modélisation et analyse qualitative – Michel LANGEAIS, Gauthier SALLET, Abderrahman IGGIDR	20
<b>C.2</b>	Processus stochastiques pour modéliser la diffusion d'épidémies – Elisabeta VERGU	21
<b>C.3</b>	Épidémiologie clinique – Fabrice CARRAT	22
<b>C.4</b>	Statistique et épidémiologie végétale – Joël CHADŒUF	23

La liste des intervenants figure dans le TABLE 4, page 28.

---

1. *Scilab* : logiciel libre de calcul scientifique, développé par le Consortium Scilab – <http://www.scilab.org/>

2. *R* : logiciel libre d'analyse statistique et graphique – <http://www.r-project.org/>

## C.1 Systèmes dynamiques en épidémiologie : modélisation et analyse qualitative

*Intervenants* : Michel Langlais, Gauthier Sallet, Abderrahman Iggidr

### Objectifs

1. Mettre en place une méthodologie destinée à construire des modèles mathématiques déterministes pour la propagation d'épidémies à l'intérieur de populations structurées en espace, en âge, par genre ou statut social.
2. Montrer quels outils mathématiques peuvent être utiles à l'analyse mathématique qualitative ou numérique des modèles mathématiques ainsi obtenus.

### Pré-requis

- Outils de base de l'algèbre linéaire (matrices et leurs éléments propres).
- Outils de base de l'analyse des systèmes dynamiques (stabilité).

Le cours débutera par des rappels sur les systèmes dynamiques.

### Plan

- *Rappels* sur les systèmes dynamiques d'équations différentielles ordinaires (EDO).
- *Modèles non structurés*
  - Modèles pionniers : Bernoulli, Kermack et Mc Kendrick.
  - Modèles avec transmissions horizontale, verticale ou indirecte : de SI à SEIRC.
  - Invasion et persistance : calcul du  $R_0$ , stabilité, états endémiques constants ou périodiques.
  - Modèles d'EDOs non autonomes, émergence de dynamiques périodiques.
- *Modèles structurés*
  - Structurations spatiales : systèmes de réaction-diffusion, systèmes multi-sites d'EDOs.
  - Structurations discrètes ou continues en âge chronologique ou en âge de l'infection.
  - Transmission inter-espèces.
- *Quelques exemples*
  - Un système simple : le modèle rage-renard roux.
  - Un système avec réservoir et transmission indirecte : le modèle rongeur-hantavirus-homme ou la toxoplasmose.
  - Un système avec vecteur : le modèle paludisme.
  - Un système avec vecteur et hôte réservoir : le modèle du West Nile Virus, ou celui de la Saint Louis Encephalitis.
- *TD & TP* sous *Scilab*.

## C.2 Processus stochastiques pour modéliser la diffusion d'épidémies

*Intervenante* : Elisabeta Vergu

**Objectif** Montrer comment les différentes approches de modélisation stochastiques reproduisent le phénomène de diffusion épidémique, permettent d'appréhender des paramètres clé des épidémies et d'évaluer leur contrôle.

### Pré-requis

- Connaissances de base en statistiques (variables aléatoires, distributions de probabilités).
- Notions sur les processus stochastiques.

### Plan

- *Modèles stochastiques à temps continu*
  - Modèles SIR markoviens.
  - Calcul de la taille d'épidémie.
- *Modèles stochastiques à temps discret*
  - Modèles de Greenwood et Reed-Frost.
  - Calcul de la taille d'épidémie.
- *Modèles individus-centrés*
- *Quelques exemples*
  - Un modèle markovien simple : la rougeole au Royaume-Uni.
  - Un modèle individu-centré : la diffusion de la grippe aviaire entre élevages en Hollande.

## C.3 Épidémiologie clinique

*Intervenant : Fabrice Carrat*

**Objectif** Présenter quelques concepts et méthodes classique en épidémiologie, relatifs à la mise en place d'études permettant d'évaluer les risques et les interventions en santé.

**Pré-requis** Connaissances de base en statistiques.

### Plan

- *Évaluation d'une exposition à un risque*
  - Définition et présentation des principaux types d'études observationnelles :
    - études prospectives/rétrospectives;
    - études cas/témoins;
    - études cohorte.
  - Présentation des mesures de forces d'association :
    - risque relatif;
    - odds-ratio.
  - Présentation des méthodes de planification et d'analyse des données dédiées à ces schémas.
- *Évaluation d'une intervention en santé (traitement, méthode diagnostique)*
  - Définition et présentation des différents types d'essais et des mesures d'efficacité ou de performance associées.
  - Présentation des méthodes de planification et d'analyse des données dédiées à ces schémas.
- *TD*



## C.4 Statistique et épidémiologie végétale

*Intervenant : Joël Chadœuf*

**Objectif** Montrer comment la statistique sert à intégrer le maximum d'information dans une étude d'épidémiologie végétale et permet d'intégrer la variabilité de l'observation dans les estimations et les prédictions.

**Pré-requis** Connaissances de base en statistiques.

Le cours reviendra sur la notion de vraisemblance.

### Plan

- *Introduction*
  - Épidémiologie : déterministe – stochastique – études de cas.
- *Présentation des spécificités du cadre végétal*
  - Les plantes sont fixées : pas de transmission sans vecteur.
  - Observations : on suit des individus, ou des groupes d'individus ; le suivi temporel est lâche.
- *Maladies liées à l'exposition à un risque*
  - Cadre de travail : maladie de type carence ; pas de transmission, pas d'interactions entre individus.
  - Le cas d'école : la binomiale.
    - traduction en modèle des hypothèses précédentes,
    - vraisemblance (définition, estimateur associé et propriétés),
    - importance de l'hypothèse d'indépendance sur un exemple,
    - exemples.
  - Intégration de cofacteurs.
    - exemple de cadre biologique type ;
    - traduction des hypothèses et modification de la vraisemblance ;
    - introduction en termes de modèle linéaire généralisé ;
    - estimateur du maximum de vraisemblance ; asymptotique ou bootstrap ?
- *Suivis temporels*
  - Cadre de travail : suivi expérimental de la réaction des plantes à un traitement (par ozone).
  - Analyse de survie : modèle paramétrique ; fonction de hasard.
  - Notion de censure indépendante.
- *Prise en compte de l'espace*
  - Cas des maladies sans transmission – cofacteurs non observés, spatialement structurés : déterminer la structure, prédire aux points non mesurés.
    - traduction en modèle, variogramme ;
    - prédiction spatiale par krigeage.
  - Cas des maladies à transmission (cas simplifié) – on observe les infectieux, ainsi que le devenir d'un échantillon de susceptibles après un cycle épidémique : estimer la dispersion.
    - traduction possible en modèle , hypothèses associées ;
    - estimation par maximum de vraisemblance.
- *TD & TP sous R.*



# Illustrations

Les illustrations montrent l'apport de la modélisation, des mathématiques et des statistiques pour répondre à une question biologique. Elles ne nécessitent a priori pas de connaissances autres que celles dispensées lors de la formation.

## Liste des illustrations

<b>I.1</b>	Propagation du BVDV entre troupeaux bovins – Pauline EZANNO	26
<b>I.2</b>	Propagation de la tremblante dans un troupeau ovin – Suzanne TOUZEAU	26
<b>I.3</b>	Approche spatiale de l'épidémiologie de l'ESB en France – Christian DUCROT*	27
<b>I.4</b>	Gestion des résistances en épidémiologie végétale – Christian LANNOU	27

\* *Cette illustration n'a pas pu être présentée aux participants.*

La liste des intervenants figure dans le TABLE 4, page 28.

## I.1 Propagation de la BVDV entre troupeaux bovins

*Intervenante : Pauline Ezanno*

**Question** Comment évaluer et comparer l'efficacité de stratégies de maîtrise de la propagation du BVDV (virus de la maladie des muqueuses) entre troupeaux bovins ?

### Plan

- *Présentation de la question biologique*
  - Impact de la maladie en Europe.
  - Principales caractéristiques de l'infection par le BVDV.
  - Vers une maîtrise collective : stratégies et diversité régionale.
- *Pourquoi modéliser ?*
- *Comment modéliser ?*
  - Dynamique de propagation intra-troupeau : cas d'un troupeau laitier.
  - Structure de contacts entre troupeaux dans une région : mouvements d'animaux et voisinage.
  - Couplage des dynamiques de propagation intra- et inter-troupeau.
- *Évaluation épidémiologique des quelques stratégies de maîtrise*

## I.2 Propagation de la tremblante dans un troupeau ovin

*Intervenante : Suzanne Touzeau*

**Question** Comment tester et quantifier les facteurs influençant la transmission de la tremblante dans un troupeau, afin de mieux comprendre ce phénomène épidémiologique ?

### Plan

- *Présentation du problème*
  - Contexte : caractéristiques de la tremblante ; données disponibles.
  - Motivations : mécanismes de transmission partiellement connus ; impact économique et sanitaire de la maladie, soumise à réglementation.
  - Objectif : modéliser les processus de transmission, tester différentes hypothèses, quantifier les paramètres.
- *Deux approches de modélisation :*
  1. dynamique de population : système d'équations aux dérivées partielles (EDP) ;
  2. modèle individu-centré (MIC) : système multi-agents.
  - Pour chacune : présentation du modèle, hypothèses simplificatrices, apport du modèle.
  - Comparaison des approches.

## I.3 Approche spatiale de l'épidémiologie de l'ESB en France

*Intervenant : Christian Ducrot*

**Question** Comment déterminer l'hétérogénéité spatiale du risque de l'ESB à l'échelle de la France ?

### Plan

- *Présentation du problème*
  - Problématique ESB.
  - Question de recherche.
- *Approche spatiale*
  - Modélisation spatiale.
  - Estimation du risque.

## I.4 Gestion des résistances en épidémiologie végétale

*Intervenant : Christian Lannou*

**Question** Comment utiliser au mieux les différentes résistances dans une région agricole pour limiter les épidémies ?

### Plan

- *Introduction de la question biologique*
  - *Résistance* : tout facteur génétique contrôlant la résistance de la plante aux maladies. Le cas classique est la résistance gène – pour – gène.
  - *Région agricole* : un ensemble de parcelles, chacune étant semée avec une variété (= un génotype) d'une plante cultivée.
  - *Épidémie* : propagation d'une maladie sur cette région. La maladie est causée par un agent pathogène (ex : un champignon) qui se disperse de plante à plante et de parcelle à parcelle. Ce pathogène évolue et s'adapte par mutation / sélection à la plante et à ses résistances.
- *Différentes approches prises dans la littérature*
  - Hypothèses simplificatrices.
  - Comparaison des approches : comment différents modèles éclairent la même question sous des angles variés.
  - Apport des approches : pour améliorer la compréhension du système biologique.

NOM		Adresse
Fabrice	CARRAT	Université Paris 6 & INSERM UMR-S 707 75571 Paris Cedex 12
Joël	CHADCEUF	INRA UR546 Biostatistique et processus spatiaux 84914 Avignon Cedex 9, France
Christian	DUCROT	INRA UR346 Épidémiologie animale 63122 Saint-Genès-Champanelle, France
Pauline	EZANNO	INRA & ENV-Nantes UMR708 Gestion de la Santé Animale BP 40706, 44307 Nantes Cedex, France
Abderrahman	IGGIDR	INRIA-Lorraine ISGMP Bât. A 57045 Metz Cedex 01, France
Michel	LANGLAIS	Université Bordeaux 2 – IMB UMR CNRS 5251 & INRIA Futurs, projet Anubis 33076 Bordeaux Cedex, France
Christian	LANNOU	INRA & AgroParisTech UMR1290 BIOGER, Pathologie végétale BP01, 78850 Thiverval-Grignon, France
Khadija	NIRI	Université Hassan II Faculté des Sciences Aïn Chock Casablanca, Maroc
Gauthier	SALLET	UPV Metz & INRIA-Lorraine & IRD – UR GÉODES ISGMP Bât. A 57045 Metz Cedex 01, France
Suzanne	TOUZEAU	INRA UR341 Mathématiques et informatique appliquées 78352 Jouy-en-Josas Cedex, France
Elisabeta	VERGU	INRA UR341 Mathématiques et informatique appliquées 78352 Jouy-en-Josas Cedex, France

TABLE 4 – Liste des intervenants.

# Liste des participants

La liste des participants est donnée ci-contre.

### Liste des participants

Nom	Prénom	Organisme de rattachement	Ville	Pays
ANDRAUD	Mathieu	AFSSA	Ploufragan	France
BARKA	Abdelhafid	Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad	Marrakech	Maroc
BENNANI	Zineb	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
BENNIS	Faiza	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
BENSOUNA	Adil	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
BERRADA LOUZI	Zakaria	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
BICHAR	Kaoutar	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
BOUGUERRA	Latifa	Université des Sciences et de Technologie Houari Boumédiène	Alger	Algérie
BOUJAOUI	Abdelhaq	Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad	Marrakech	Maroc
CHOUAYAKH	Kanza	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
DEGUENON	Judicael	École Polytechnique de l'Université d'Abomey-Calavi	Abomey-Calavi	Bénin
DIMI	Jean-Luc	Université Marien Ngouabi	Brazzaville	Congo
EL KHOU	Mohamed	Faculté des Sciences, Université Ibn Tofail	Kénitra	Maroc
FALL	Abdoul Aziz	Université Gaston Berger & Univ. Paul Verlaine (Metz, France)	Saint-Louis	Sénégal
FGHIRE	Rachid	Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad	Marrakech	Maroc
GIMENEZ	Olivier	CNRS	Montpellier	France
HARTI	Saad	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
IVORRA	Benjamin	Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Complutense	Madrid	Espagne

*Suite page suivante*



<b>Nom</b>	<b>Prénom</b>	<b>Organisme de rattachement</b>	<b>Ville</b>	<b>Pays</b>
JERRY	Chakib	Faculté des Sciences, Université Ibn Tofaïl	Kénitra	Maroc
JOUNDI	Meriem	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
JRAIFI	Abdelilah	Faculté des Sciences, Université Ibn Tofaïl	Kénitra	Maroc
KAFI	Oualid	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
KIOUACH	Driss	Faculté de Sciences Dhar-Mahraz	Fès	Maroc
KOTE	Blami	Université de Ouagadougou	Ouagadougou	Burkina Faso
LAHMAR	Malak	Faculté des Sciences, Université Ibn Tofaïl	Kénitra	Maroc
NAZIH	Simohamed	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
NGOM	Diène	Université Gaston Berger & LORIA (Metz, France)	Saint-Louis	Sénégal
NOUASSE	Houda	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
OBAID	Tariq	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
OUCHAIR	Aziz	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
OUHINO	Aziz	Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad	Marrakech	Maroc
OULD BABAH	Khaled	Faculté des Sciences Ben M'sik, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
OUMANAR	Youssef	Faculté des Sciences, Université Ibn Tofaïl	Kénitra	Maroc
OUMOUNI	Mustapha	Faculté des Sciences, Université Ibn Tofaïl	Kénitra	Maroc
OURIEM	Hamza	Faculté des Sciences, Université Ibn Tofaïl	Kénitra	Maroc
QABIL	Abdelbaset	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
SABRI	Abdelkarim	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc

*Suite page suivante*

<b>Nom</b>	<b>Prénom</b>	<b>Organisme de rattachement</b>	<b>Ville</b>	<b>Pays</b>
SALAMA	Hind	Faculté des Sciences Ain Chock, Université Hassan II	Casablanca	Maroc
SANOGO	Chata	Faculté des Sciences, Université Ibn Tofaïl	Kénitra	Maroc
TCHINDA MOUOFO	Plaire	Faculté des Sciences, Université de Douala	Douala	Cameroun
ZIYADI	Najat	Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad	Marrakech	Maroc